Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções
CBPAT2016

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

DURABILIDADE DE ARMADURAS COM ELETRODEPOSIÇÃO DE ZINCO E DA LIGA ZINCO-NÍQUEL FRENTE À AÇÃO DE CLORETOS

D.V. RIBEIRO
Professor
Universidade Federal da Bahia
Salvador, Bahia, Brasil
verasribeiro@hotmail.com

C.A. CALDAS
Professor
Universidade Federal da Bahia
Salvador, Bahia, Brasil
caldassouza@hotmail.com

V.L.S. ALMEIDA
Pesquisador IC
Universidade Federal da Bahia
Salvador, Bahia, Brasil
vitorlsa@hotmail.com

RESUMO

A corrosão em estrututas de concreto armado é um dos maiores problemas patológicas verificados em todo o mundo. Diversas técnicas, entre elas o uso de armaduras especiais são desenvolvidas a fim de atenuar este problema. O presente trabalho avaliou os parâmetros de corrosão das barras de aço revestidas com Zinco (Zn) e com a liga Zinco-Níquel (Zn-Ni), por eletrodeposição, comparando-as com as tradicionalmente utilizadas, sem revestimento. Para isso, utilizaram-se amostras de concreto armado que foram submetidas a ensaios acelerados de corrosão por ação de cloretos (câmara de névoa salina – "salt spray" e ciclos de imersão e secagem). O potencial de corrosão das armaduras foi medido para monitoramento qualitativo do processo e, após o fim dos ensaios, estimaram-se as taxas de corrosão das barras, através da perda de massa, para análise quantitativa. As barras revestidas com Zn e Zn-Ni se mostraram mais resistentes à corrosão, quando comparadas com as barras convencionais, em ambientes com forte ação de cloretos e o envelhecimento por ciclos se mostrou muito mais eficiente na aceleração do processo de corrosão
Palavras-chave: eletrodeposição, zinco, níquel, concreto armado, corrosão.

ABSTRACT

This paper shows the analysis performed on the corrosion parameters of three groups of reinforcing steel bars, two of these coated by electroplating process with Zinc (Zn) and Zinc-Nickel (Zn-Ni), and the other without any coating. It was used reinforced concrete specimens, which ones were grouped and then subjected to two different corrosion accelerating methods: aging wetting/drying cycles and salt spray exposure. Corrosion potential was measured to qualitative monitoring of the process and, after the end of the tests, corrosion rate was estimated by measuring the mass loss, to quantitative analyses. As it was expected, coated bars presented a better performance than the average bars regarding the corrosion resistance in chloride ions containing environments. It was also observed that the drying/ NaCl solution wetting cycles seems to be more severe than salt spray fog apparatus with respect to the acceleration of corrosion process.
Keywords: electroplating, zinc, nickel, reinforced concrete, corrosion.

1. INTRODUÇÃO

Processos corrosivos em estruturas de concreto armado têm ocorrido no Brasil e trazem riscos à integridade dos seus usuários. Esses casos são ainda mais numerosos em estruturas situadas na orla marinha, onde se concentra a maior parte da população brasileira [1]. Estima-se que cerca de 5% do PIB de uma nação sejam direcionados à solução de problemas relacionados à corrosão. No Brasil, esse gasto ultrapassa os R$ 10 bilhões ao ano [2].

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

Muitas vezes tratada em segundo plano, a durabilidade das estruturas de concreto armado é de extrema importância e merece mais atenção. Yeomans [3] afirma que a boa prática nas construções de concreto armado, utilizando-se materiais adequados ao ambiente de exposição, atentando-se para o correto posicionamento das armaduras na fôrma e garantindo correto lançamento, compactação e cura, seria suficiente para amenizar o problema de corrosão. Entretanto, devido à deficiência perceptível em nossos processos de construção, ainda se recorre, frequentemente, a técnicas que melhoram a interface concreto/armadura.

Entre as técnicas mais utilizadas, destaca-se a aplicação de revestimentos galvânicos na armadura, utilizando metais mais nobres que o aço. O metal mais utilizado comercialmente para cobrimentos galvânicos é o zinco [3], principalmente devido à sua habilidade de formar um filme protetor denso e aderente na superfície da armadura, tornando a taxa de corrosão muito mais baixa que a taxa observada em materiais ferrosos.

Ao Zinco (Zn) muitas vezes são adicionados outros componentes, como Cobalto (Co), Ferro (Fe) e Níquel (Ni), formando ligas Zn-Co, Zn-Fe e Zn-Ni, devido às suas melhores propriedades em comparação com revestimentos de zinco puro. Nesse contexto, os compostos com base em Zn-Ni estão atraindo um maior interesse na área de proteção contra a corrosão, uma vez que possuem melhores propriedades químicas e mecânicas [4].

A proteção por galvanização pode ser feita por dois principais métodos: galvanização: a quente e por eletrodeposição. Na galvanização a quente, a barra de aço é imersa na solução da substância a ser galvanizada, sob temperaturas superiores a 400º C. Por outro lado, o processo de eletrodeposição, também conhecido como galvanização a frio, consiste na eletrodeposição dos íons do metal mais nobre no substrato através da imposição de uma corrente elétrica. Trata-se de um processo muito comum na indústria, capaz de gerar um revestimento relativamente livre de poros e fino, evitando excesso de material depositado [5, 6, 7]. A espessura do revestimento é influenciada por alguns fatores como densidade de corrente, concentração dos sais, temperatura do banho, presença de aditivos e pela natureza do metal-base [8]. Além disso, diferentemente da galvanização a quente, nesse método não há formação de ligas intermetálicas, dando origem a um revestimento composto mais homogêneo, fino e que não afeta as propriedade mecânicas do seu substrato [9].

Várias são as técnicas empregadas para a constatação e avaliação da corrosão e, entre as mais utilizadas, encontram-se as técnicas eletroquímicas, que podem ser utilizadas tanto em laboratório como em campo. Dentre as técnicas eletroquímicas, cita-se o potencial de corrosão, cujo monitoramento permite registrar mudanças no processo eletroquímico de corrosão (devidas às variações bruscas de potencial), o que pode ser muito interessante para o monitoramento de estruturas. Porém, seus valores indicam o balanço entre a reação anódica e catódica e não oferecem informações quantitativas, isto é, não é possível extrair informações sobre a velocidade real de corrosão da armadura [10].

Apesar do potencial de corrosão (E_{corr}) não oferecer medidas quantitativas do estado da corrosão, permite um mapeamento das regiões com processo de corrosão iniciado e seu uso está em processo crescente de utilização [4]. Por meio de valores de referência, fornecidos pela norma americana ASTM C-876/91 ("*Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*"), pode-se ter noção do estado do processo de corrosão.

A norma informa as faixas de potencial de referência de acordo com o tipo de eletrodo. Segundo a Tabela 1, para o eletrodo de calomelano, usado nessa pesquisa, é indicado onde existe uma probabilidade menor que 10% de ocorrência da corrosão, indicando provável estado passivo (E_{corr} > -0,124 V), incerteza total (-0,124 > E_{corr} > -0,247 V) e a faixa de potencial que indica alta probabilidade de ocorrência de corrosão (E_{corr} < -0,247 V) [14].

Tabela 1 - Probabilidade de corrosão da armadura de aço em função do potencial de corrosão (E_{corr}), tendo como referência diversos tipos de eletrodo [14].

Tipo de eletrodo	Probabilidade de ocorrer a corrosão		
	< 10%	10% - 90%	> 90%
ENH*	> 0,118 V	0,118 V a -0,032 V	< -0,032
$Cu/CuSO_4,Cu^{2+}$ (ASTM C876)	> -0,200 V	-0,200 V a -0,350 V	< -0,350
$Hg,Hg_2Cl_2/KCl$ (sol. saturada)**	> -0,124 V	-0,124 V a -0,274 V	< -0,274
Ag,AgCl/KCl (1M)	> -0,104 V	-0,104 V a -0,254 V	< -0,254

***** Eletrodo Normal de Hidrogênio.
** Eletrodo de calomelano saturado, utilizado nesta pesquisa.

É importante lembrar que tal norma nos fornece diretrizes apenas para análise de armaduras de aço sem revestimento. Uma vez que a interpretação dos resultados dos ensaios eletroquímicos será afetada devido à mudança de potencial entre o zinco, o zinco-níquel e o aço, é importante saber como interpretar o potencial do eletrodo de referência, já que os valores de referência sugeridos pela ASTM C-876 para a corrosão do aço não são mais aplicáveis [4].

Como já foi observado por Sherine et al. [11] e Panek et al. [12], quando o aço é galvanizado com zinco, seu potencial de corrosão em relação ao eletrodo de calomelano saturado diminui e o potencial indicador de alta probabilidade de corrosão é abaixo de -1,043 V, enquanto a passivação é notada em potenciais maiores que -0,650 V. Ainda segundo Panek et al. [12], o potencial de corrosão que indica alta probabilidade de corrosão do aço galvanizado com liga Zinco-Níquel é abaixo de cerca de -0,953 V, e o potencial indicador de passivação acima de -0,550 V. Tais valores foram adotados como parâmetros para interpretação dos resultados de potencial de corrosão encontrados nas barras galvanizadas com zinco e zinco-níquel, respectivamente, de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2. Faixas de potencial de corrosão, utilizando como referência o eletrodo de calomelano saturado, indicando a maior probabilidade de corrosão ou passivação das armaduras, de acordo com a sua condição superficial [11, 12].

Condição de superfície	Potencial indicador de passivação (V)	Potencial indicador de corrosão (V)
Aço convencional	> -0,124	< -0,274
Eletrodeposição de Zn	> -0,650	< -1,043
Eletrodeposição de Zn-Ni (5%)	> -0,550	< -0,953

Nesse contexto, essa pesquisa tem como objetivo estudar a influência da galvanização, por eletrodeposição de zinco e zinco-níquel, na probabilidade de ocorrer corrosão nas armaduras de aço no concreto armado. Para viabilizar o processo, os corpos de prova foram submetidos a ensaios acelerados de corrosão, monitorados pela técnica eletroquímica de potencial de corrosão e estimando-se a taxa de corrosão das armaduras ao final dos ensaios, por meio do cálculo da perda de massa.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

No presente estudo utilizou-se cimento CP II Z-32, marca Poty, brita de origem basáltica e areia de jazida comercializadas na região metropolitana de Salvador e barras de aço carbono foram da classe CA 50-A, de diâmetro igual a 6,3mm.

2.2. Métodos

2.1.1 Caracterização dos Materiais

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

A caracterização do cimento envolveu parâmetros físicos tais como área superficial específica (estimados por BET, usando um equipamento Micrometrics Gemini 2370 V1.02) e densidade (Picnômetro a Hélio Accupyc 1330 V2.01 da Micrometrics), além da distribuição do tamanho de partículas (Sedígrafo a laser Mastersizer 2000).

A areia e a brita tiveram suas granulometrias determinadas de acordo com a NBR NM 248:2003, assim como o Módulo de Finura e a Dimensão Máxima Característica. A massa específica da areia foi determinada segundo a NBR NM 52:2009, enquanto a massa específica da brita foi determinada de acordo com a NBR NM 53 e a massa específica do cimento foi determinada pelo método do frasco de Le Chatelier, de acordo com a NBR NM 23/01.

2.1.2 Dosagem do Concreto e medidas de potencial de corrosão

O traço do concreto utilizado neste estudo foi de 1,0 : 1,5 : 1,3 : 0,5 (cimento : areia : brita : água). O teor de argamassa foi de 75% e o consumo de cimento igual a 526 kg/m^3. Após a mistura em betoneira, foi usada mesa vibratória para uma melhor compactação. Concretos contendo distintos tipos de armaduras (convencional e revestidas por zinco e zinco-níquel) foram preparados e analisados.

Para as medidas do potencial de corrosão foram moldados corpos de prova prismáticos (50x70x90 mm^3) e as barras de aço, com diâmetro de 6,3mm, foram inseridas no momento da moldagem. Todos os corpos de prova foram desmoldados após 24 horas e colocados em cura submersa durante 28 dias. Quatro corpos de prova foram moldados e testados em cada determinação.

2.1.3 Galvanização

O processo utilizado para a galvanização das barras foi a eletrodeposição. Nesse processo, foi montado um circuito elétrico para eletrodepositar os íons da solução eletrolítica na barra de aço através da aplicação de uma corrente elétrica. As composições de tais soluções são apresentadas nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3. Composição da solução eletrolítica utilizada para eletrodeposição de zinco.

Solução de Zinco (g/L)	
Cloreto de Potássio	208
Cloreto de Zinco	19,6
Ácido Bórico	20

Tabela 4. Composição da solução eletrolítica utilizada para eletrodeposição da liga zinco-níquel.

Solução de Zinco-10%Níquel (g/L)	
Cloreto de Níquel	34,5
Cloreto de Amônio	150
Cloreto de Zinco	38,5
Ácido Bórico	20

Antes de serem galvanizadas, as barras foram limpas com escovas de aço e lavadas com água destilada e álcool, para retirar quaisquer impurezas que aderissem à superfície, garantindo a eficiência da eletrodeposição.

O circuito foi montado ligando uma fonte elétrica a um eletrodo de grafite, imerso na solução eletrolítica para garantir uma distribuição uniforme de corrente através da solução na qual a barra também ficou imersa, sendo ligado a ela um multímetro, para verificação da corrente. Este multímetro foi ligado à fonte elétrica fechando-se, assim, o circuito, conforme esquema ilustrado na Figura 1.

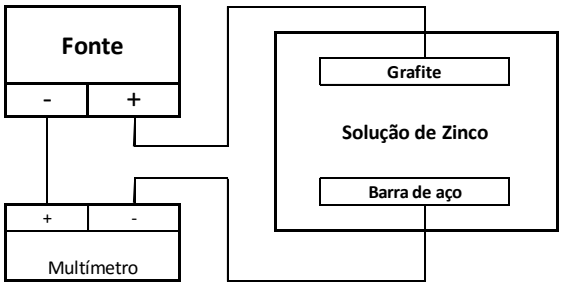

Figura 1: Representação do circuito elétrico utilizado para eletrodeposição dos íons das soluções eletrolíticas nas barras a serem galvanizadas

A fim de se obter um revestimento com espessura de 5µm, calculou-se, de acordo com a metodologia proposta por Pedroza [8] a necessidade de aplicação de uma corrente de 314,6 mA, com tempos de eletrodeposição de 9 e 8 minutos, para as eletrodeposições de Zinco e de Zinco-Níquel, respectivamente.

De acordo com as micrografias da Figura 2, o cobrimento resultante apresentou uma distribuição uniforme dos íons eletrodepositados, compondo uma camada superficial homogênea, entretanto, com morfologias diferentes, de acordo com a composição da solução eletrolítica. Enquanto o revestimento de Zinco apresentou uma superfície formada por grãos em formato de placa, de tamanhos variados e mal distribuídos, o revestimento de Zinco-Níquel apresentou uma superfície mais homogênea, composta por grãos esféricos e bem distribuídos, conforme já foi observado em estudos anteriores [6, 13].

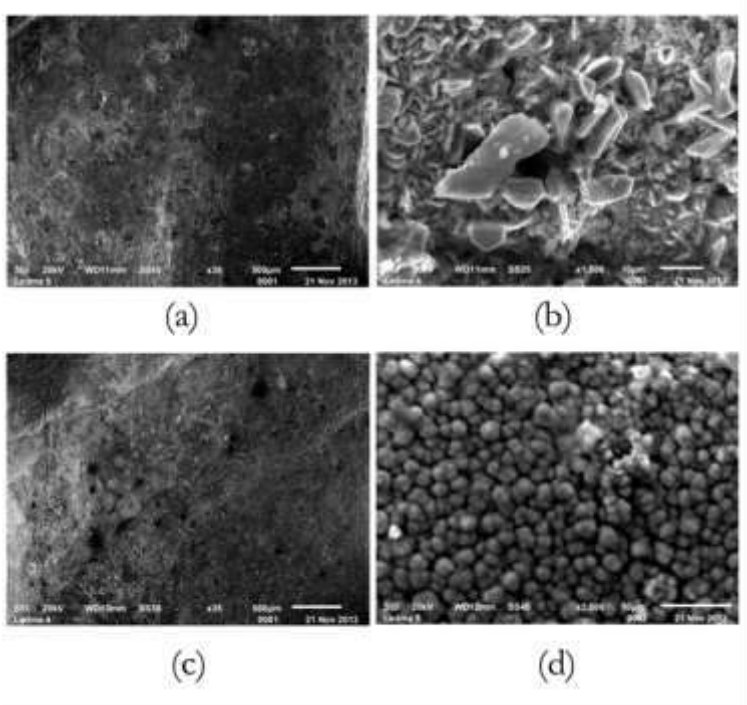

Figura 2: Micrografias das superfícies das barras após o processo de eletrodeposição de (A - B) Zinco e (C – D) Zinco-Níquel

2.1.3 Medida do Potencial de Corrosão

As barras de aço foram pesadas em uma balança analítica com precisão de 0,01 g. Em seguida, fez-se a delimitação com fita isolante da área na barra a ser exposta ao ataque do agente agressivo (cerca de 15,83 cm²), como pode ser visto nas Figuras 3a e 3b. As barras foram posicionadas de forma que a área exposta estivesse localizada na região central dos corpos de prova (não isolada) como pode ser visto na Figura 3d.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

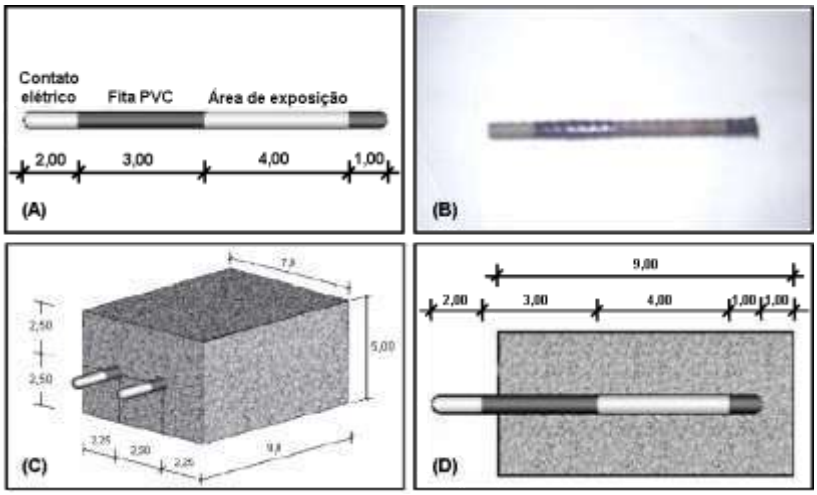

Figura 3. (A) e (B) Esquema da delimitação da área de exposição da barra e; (C) e (D) Posicionamento da barra no corpo de prova (adaptado de SANTOS [11]). Todas as medidas da Figura estão em centímetro (cm)

A verificação do potencial de corrosão consiste, basicamente, em um ensaio acelerado de corrosão pela ação de cloretos. A célula eletroquímica utilizada para as medidas do potencial de corrosão foi composta pelo eletrodo de trabalho, a barra de aço do corpo de prova prismático e o eletrodo de calomelano saturado (ECS), utilizado como eletrodo de referência.

Antes da realização das medidas, os corpos de prova tinham a face de leitura pré-umidificada por meio do posicionamento de uma esponja umedecida em solução condutora sobre esta superfície, durante um minuto. Esta solução condutora, obtida de acordo com a ASTM C-876/91 *("Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete"*) contém 5mL de detergente neutro para um litro de água potável e apresentou uma condutividade de 0,15 ± 0,02 mS/cm. Para a realização das medidas, o eletrodo de referência é posicionado sobre a barra a ser analisada, aproximadamente no centro da área de exposição da mesma e seu contato é feito por meio de uma esponja umedecida.

O ensaio de corrosão foi iniciado após 63 dias de cura, quando os corpos de prova apresentaram constância de massa (variação de 1,0 g em leituras consecutivas de 24 h) e quando o potencial de corrosão medido indicou a formação do filme passivo na superfície das barras de aço utilizadas (E_{corr} > -0,124 V, para as barras de referência; E_{corr} > -0,650 V, para as barras revestidas com Zinco; e E_{corr} > -0,550 V, para as barras revestidas com Zinco-Níquel).

Em outros trabalhos [14-16], achou-se necessário definir uma idade específica, ou idade de referência, a partir da qual foram iniciados os procedimentos dos ensaios acelerados de corrosão. Estes autores atrelaram a idade de referência à estabilização do processo de hidratação do cimento e definiram a idade de 63 dias [14, 16] e 80 dias [15] como suficientes para que a estrutura das pastas analisadas apresentasse estrutura física relativamente desenvolvida e grau de hidratação significativamente elevado.

Após atingir o "potencial de segurança" (E_{corr} > -0,124 V, para as barras de referência; E_{corr} > -0,650 V, para as barras revestidas com Zinco; e E_{corr} > -0,550 V, para as barras revestidas com Zinco-Níquel), os corpos de prova foram submetidos a dois ensaios acelerados de corrosão: i ciclos de imersão e secagem e câmara de névoa salina ("*salt spray*").

No primeiro método, os corpos de prova são submetidos a semi-ciclos de imersão parcial em solução com 3% de cloreto de sódio (NaCl) com duração de dois dias e posteriores semi-ciclos de secagem em estufa ventilada a 50ºC com duração de 5 dias. Durante o semi-ciclo de imersão parcial, o nível da solução de imersão foi mantido em uma altura correspondente à metade da área exposta da barra. Nesta condição, o ingresso de cloretos ocorre inicialmente por absorção capilar, já que os corpos de prova apresentam-se inicialmente secos, e por difusão após a saturação dos poros, e é acelerado devido à evaporação da água através da parte exposta do concreto [14]. De acordo com MCCARTER apud SANTOS [15], em um material poroso, há uma relação entre a força de sucção capilar e o grau de saturação.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

Assim, quando existe uma região exposta e seca, as forças de sucção serão maiores e irão resultar em um movimento da água no interior do concreto mais rápido.

A concentração da solução de imersão era medida antes de iniciar cada semi-ciclo de umedecimento e ajustada sempre que necessário. Além disso, esta solução utilizada é trocada por uma nova com a mesma concentração a cada quatro ciclos.

Ao final de cada semi-ciclo foram medidos o E_{corr} e a massa dos corpos de prova. O potencial de corrosão foi utilizado como um indicativo da condição de passivação das barras e a variação de massa dos corpos de prova após cada semi-ciclo fez-se necessária para a avaliação do grau de saturação dos poros dos concretos analisados.

Por meio da análise dos resultados obtidos de E_{corr}, observou-se se a barra apresenta-se em estado ativo ou passivo de corrosão, utilizando como referência o eletrodo de calomelano saturado. O ensaio foi finalizado no momento em que 2 ciclos completos e consecutivos apresentassem valores de potencial de corrosão abaixo do valor crítico.

No ensaio conhecido como "salt spray", os corpos de prova foram submetidos a uma câmara de névoa salina (Equilam SS600e), sob condições controladas segundo a ASTM B-117 ("Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus"). Conforme a referida norma, a solução salina utilizada deve apresentar concentração de 5% de NaCl, o pH deve ser mantido entre 6,5 e 7,2 e a temperatura da câmara em 35ºC. Foram feitas medidas periódicas dos potenciais de corrosão para monitoramento da corrosão dos corpos de prova.

Após a finalização de cada um dos ensaios, as barras foram extraídas dos corpos de prova, limpas de acordo com a ASTM G-1/03 e pesadas para observar a perda de massa e comparar com o valor verificado antes do início do ensaio. Assim, a taxa de corrosão (TC) pode ser calculada, de acordo com a equação (1).

$$TC = \frac{K.W}{A.T.D} \quad (1)$$

Sendo K = constante (para TC em μm/ano, $K=8{,}76.10^7$; para TC em g/m^2.ano, $K = 8{,}76.10^7$.D); W = perda de massa (g); A = área de exposição (cm^2); T = tempo de exposição (h); D = densidade (para o aço CA-50, D = 7,85 g/cm^3). No presente estudo, A = 15,83 cm^2 e T =Tempo de duração dos ensaios.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização dos materiais

O cimento Portland utilizado apresentou área superficial específica igual a 0,425 m^2/g e massa específica igual a 2,98 Kg/dm^3. A areia apresentou massa específica igual a 2,63 Kg/dm^3, Módulo de Finura igual a 1,52 e é classificada como areia fina. A brita teve massa específica igual a 2,79 Kg/dm^3 e Dimensão Máxima Característica igual a 9,5 mm. As distribuições granulométricas dos mesmos podem ser vistas na Figura 4.

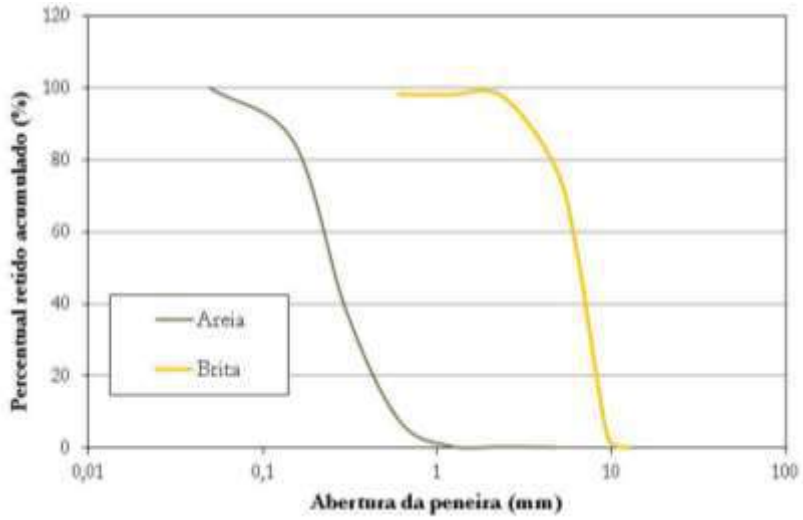

Figura 4. Distribuição de tamanho de partículas da areia e da brita.

3.2. Potencial de Corrosão

O potencial de corrosão das barras inseridas em corpos de prova submetidos ao ensaio acelerado, através de ciclos de imersão e secagem, foi medido após cada semi-ciclo e está apresentado na Figura 5.

Ao longo do ensaio, os valores de potencial de corrosão apresentaram comportamento esperado e percebido na literatura [14], onde as medidas efetuadas após o semiciclo de imersão mostram potenciais muito mais negativos do que as medidas após o semiciclo de secagem. Tal fato é explicado por Rocha [17], que mostra que a temperatura, a umidade e o grau de saturação interferem diretamente nas medidas eletroquímicas de potencial de corrosão e que essa interferência é ainda agravada quando há contaminação por cloretos.

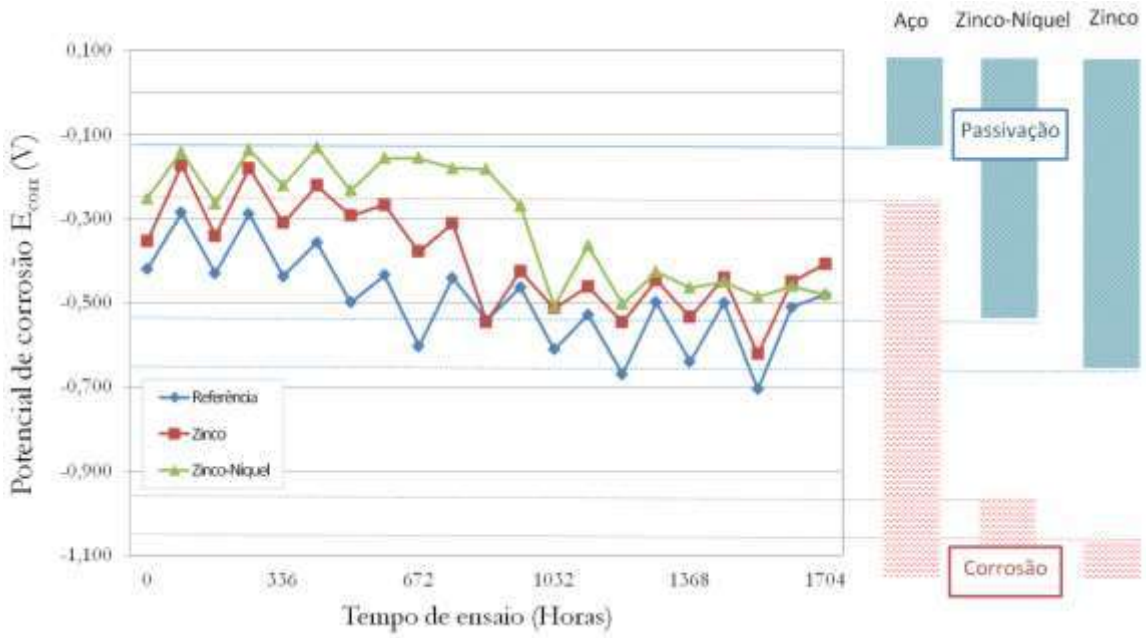

Figura 5. Evolução dos potenciais de corrosão durante o ensaio de envelhecimento por ciclos das barras galvanizadas e de referência e as probabilidades de ocorrência de corrosão para os diferentes tipos de cobrimento (à direita).

No ensaio de envelhecimento por névoa salina, as condições descritas anteriormente (temperatura, umidade e grau de saturação) se mantêm constantes, levando a um comportamento diferente, conforme apresentado na Figura 6.

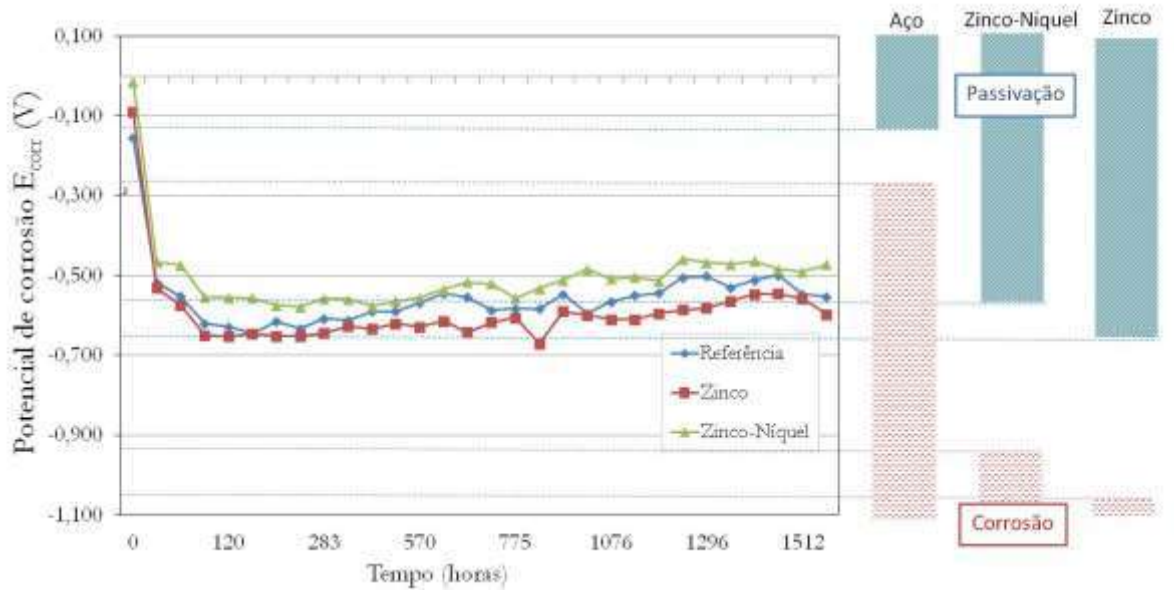

Figura 6. Evolução dos potenciais de corrosão durante o ensaio de envelhecimento por câmara de névoa salina das barras galvanizadas e de referência e as probabilidades de ocorrência de corrosão para os diferentes tipos de cobrimento (à direita).

Conforme sugere González et al. [18], as medidas de potencial não são conclusivas por si só, devido à gama de fatores que a influenciam, demandando o levantamento de informações complementares, como resistividade do concreto, porém, nos fornece uma indicação preliminar da situação das barras quanto à corrosão. Como visto, o potencial de corrosão das barras revestidas se manteve dentro da faixa de incerteza (E_{corr} > -1,043 V, para as barras revestidas com Zinco e E_{corr} > -0,953 V, para as barras revestidas com a liga Zinco-Níquel), enquanto as barras de referência, sem revestimento, apresentaram potenciais mais eletronegativos do que o potencial indicador de alta probabilidade de corrosão (E_{corr} < -0,274 V). Tal comportamento nos indica uma proteção das armaduras quanto à despassivação, principalmente para as armaduras com cobrimento de zinco-níquel, quando revestidas com Zinco e Zinco-Níquel, por eletrodeposição, a partir do retardo da mudança do estado passivo para o ativo, dado pelo revestimento, porém, por ser uma análise de caráter meramente qualitativo, não nos permite compará-los quanto à eficiência da proteção.

3.3. Taxa de Corrosão

As perdas de massa observadas nas barras após o fim dos ensaios acelerados nos permitiram estimar as taxas de corrosão médias, de acordo com as condições superficiais e com o ensaio ao qual foi submetido, conforme apresentado nas Figuras 7 e 8. Como esperado, em ambos os ensaios, as barras galvanizadas apresentaram menor taxa de corrosão do que às barras de referência.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

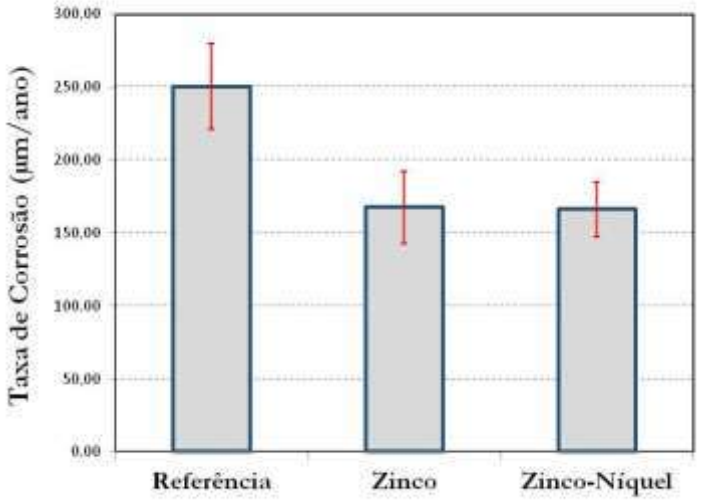

Figura 7. Taxas de corrosão das barras de referência, galvanizadas com Zinco e com Zinco-Níquel após o ensaio de envelhecimento por ciclos de imersão e secagem.

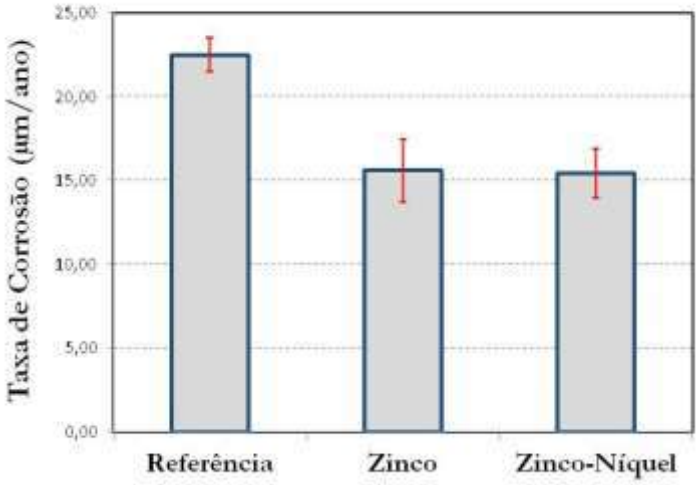

Figura 8. Taxas de corrosão das barras de referência, galvanizadas com zinco e galvanizadas com zinco-níquel após o fim do envelhecimento por névoa salina.

No ensaio de envelhecimento por ciclos, as barras sem galvanização apresentaram uma taxa de corrosão (250,40 µm/ano) maior que as barras galvanizadas com zinco (167,49 µm/ano) e com zinco-níquel (166,15 µm/ano). Foi possível verificar uma diminuição de 33,1% e 33,6%, respectivamente, na taxa de corrosão pela análise dos valores das médias, o que representa um ganho de durabilidade das peças galvanizadas. Podemos observar, ainda, que o revestimento de Zinco-Níquel apresentou resultados de taxa de corrosão levemente melhores e com desvio padrão menor, apresentando um comportamento compatível à distribuição mais uniforme das partículas eletrodepositadas na superfície da barra.

É importante salientar que a espessura adotada para os filmes de zinco e de zinco-níquel (5 µm) pode ter influenciado no alto desvio dos resultados, visto que os revestimentos usuais de ligas de zinco apresentam valores bem superiores (da ordem de 100 µm). Isso pode ter contribuído para uma formação deficiente da película de óxidos de zinco que retardariam a corrosão. Além disso, podem ter ocorrido falhas localizadas, contribuindo para a ocorrência de formas de corrosão diferentes da uniforme, a qual é pressuposto do cálculo da taxa.

Os resultados da taxa de corrosão para o ensaio de exposição à névoa salina (Figura 8) demonstram uma variabilidade bem menor, assim como uma ordem de grandeza bem menor, o que demonstra a agressividade menos acentuada desse método. Aqui, encontrou-se uma taxa de 22,50 µm/ano para as barras convencionais, 15,58 µm/ano para as barras galvanizadas com zinco e 15,40 µm/ano para as barras galvanizadas com zinco-níquel. Mais uma vez, verifica-se o aumento da vida útil da peça.

Assim, é possível comparar as eficiências dos ensaios acelerados de corrosão, a partir das medidas das taxas de corrosão. Enquanto as barras de referência apresentaram uma taxa de corrosão média de 250,40 µm/ano no envelhecimento por ciclos, na câmara de névoa salina essa taxa média foi de apenas 22,50 µm/ano. O mesmo acontece com as barras galvanizadas, que no primeiro ensaio apresentaram taxa média de 167,49 µm/ano e 166,15 µm/ano, enquanto no segundo ensaio essa taxa foi de 15,58 µm/ano e 15,40 µm/ano, para as barras revestidas com zinco e zinco-níquel, respectivamente, mostrando que o ensaio acelerado por ciclos mostra-se mais eficiente para a avaliação de corrosão em corpos de prova de concreto armado.

Tal diferença pode ser justificada pela escassez de um dos componentes indispensáveis para o desencadamento do processo de corrosão: o oxigênio. Devido ao fato de a câmara de névoa salina ser vedada e os corpos de prova estarem na maior parte do tempo saturados, a entrada de oxigênio fica debilitada, dificultando a corrosão. Assim, possíveis alterações na sistemática do ensaio, que permitam uma maior entrada de oxigênio, podem torná-lo mais eficiente na aceleração da corrosão em corpos de prova de concreto armado.

4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que:

- A eletrodeposição é um método eficiente de proteção das armaduras de aço para a construção civil;
- Os revestimentos de zinco e zinco-níquel mostraram-se eficazes no aumento de vida útil das armaduras, apesar da espessura adotada para o trabalho ter se mostrado insuficiente para grandes aumentos na vida útil, possivelmente interferindo na performance de proteção dos revestimentos;
- Os revestimentos de zinco-níquel apresentou melhores resultados quanto à proteção da armadura, pois, apesar de apresentar uma taxa de corrosão semelhante, retardou de forma mais eficiente o início do processo corrosivo;
- O ensaio acelerado por ciclos de secagem e umedecimento mostrou-se mais eficiente para a avaliação de corrosão em corpos de prova de concreto armado, em comparação ao ensaio de exposição à névoa salina.
- A utilização de técnicas mais refinadas de monitoramento da corrosão se fazem necessárias para se obter um melhor entendimento do funcionamento do revestimento de ligas de zinco e zinco-níquel no concreto armado, visto que a literatura sobre o tema é escassa.

5. AGRADECIMENTOS

À Pró-Reitoria de Pesquisa, Criação e Inovação (PROPCI), ao CNPq, CAPES e FAPESB, além de toda equipe do LEDMA e do LAMET pelo apoio.

6. REFERÊNCIAS

[1] GENTIL, V. *Corrosão*, Rio de Janeiro: LTC, 5ed, 345p. 2007.
[2] CALLISTER, Jr., W.D. *Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução*, Rio de Janeiro: LTC, 7ed, 589 p., 2008.
[3] YEOMANS, S. R. (Ed.) Galvanized Steel Reinforcement in Concrete. [Camberra]: *Elsevier*, 2004. cap. 6.
[4] BROOMFIELD, J. P. *Galvanized Steel Reinforcement in Concrete: A Consultant's Perspective* In: YEOMANS, S. R. (Ed.) Galvanized Steel Reinforcement in Concrete. [Camberra]: Elsevier, 2004. cap. 9.
[5] GRAVILA, M. *et al*. "Corrosion behaviour of zinc-nickel coatings, electrodeposited on steel". *Surface and Coatings Technology* v.123, 1999; p164-172.

[6] GHAZIOF, S.; GAO, W. "Electrodeposition of single gamma phased Zn-Ni alloy coatings from additive-free acidic bath". *Applied Surface Science*, v.311, 2014; p635-642.
[7] WILCOX, G. D.; GABE, D. R. "Electrodeposited zinc alloy coatings", *Corrosion Science* 35 (5-8) (1993) 1251-1258.
[8] PEDROZA, G. A. G. *Efeito da Glicerina como aditivo na Resistência à Corrosão de um Depósito da Liga Zn-Ni, obtido através de Eletrodeposição*, Salvador, 2009, Dissertação (mestrado), Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, 112p.
[9] ZEMPULSKI, L. N.; ZEMPULSKI, M. F. S. *Dossiê técnico: galvanização eletrolítica*. Instituto de Tecnologia do Paraná TECPAR, 2007, p.21.
[10] FREIRE, K. R. R. "*Avaliação do desempenho de inibidores de corrosão em armaduras de concreto*", Curitiba, 2005, Dissertação (mestrado), Universidade Federal do Paraná.
[11] SHERINE H. B. *et al*. "Corrosion behaviour of stainless steel 304 electroplated with zinc followed by blue passivation". *Portugaliae Electrochimica Acta*, v.29, n.4, 2011; p.295-305.
[12] PANEK, J. *et al.* "The corrosion resistance of zinc-nickel composite coatings", *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering Katowice*, v.45, n.2, 2011; p.157-162.
[13] RAMANAUSKAS, R. *et al*. "Corrosion resistance and microstructure of electrodeposited Zn and Zn alloy coatings", *Surface and Coatings Technology* 92 (1-2) (1997) 16-21.
[14] RIBEIRO D. V. *et al*. "Effect of the addition of red mud on the corrosion parameters of reinforced concrete". *Cement and Concrete Research*, v. 42, 2012; p.124-133.
[15] SANTOS, L. Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto, Brasília, 2006, Dissertação (mestrado), Universidade de Brasília, 161p.
[16] BAUER, E. Avaliação comparativa da influência da adição de escória de alto-forno na corrosão das armaduras através de técnicas eletroquímicas, São Paulo, 1995, Tese (doutorado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 236p.
[17] ROCHA, F. C. da. Leituras de potencial de corrosão em estruturas de concreto armado: influência da relação água/cimento, da temperatura, da contaminação por cloretos, da espessura de cobrimento e do teor de umidade do concreto, Curitiba, 2012, Dissertação (mestrado), Universidade Federal da Paraná.
[18] GONZÁLEZ, J. A. *et al*. "Considerations on reproducibility of potential and corrosion rate measurements in reinforced concrete". *Corrosion Science*, v.46, p.2467-2485, 2004.